

基于机器视觉的线束末端包覆质量检测系统研究

张慧敏, 薛琛, 郭兴召, 黄程

(上海应用技术大学 机械工程学院, 上海 201418)

摘要: **目的** 为了自动、准确地识别汽车线束末端包覆质量, 以工业机器人和工业相机为基础, 设计一种基于机器视觉的汽车线束末端包覆质量检测系统。**方法** 该系统使用置于工业机器人手臂的 CCD 工业相机采集图像信息, 首先运用 HALCON 对系统进行标定, 其次通过梯度腐蚀等预处理, 角点检测等方法得到线束的节点坐标, 然后以归一化匹配标准为基础, 提出多区域双层的多阈值模板匹配算法对线束末端包覆质量快速识别, 计算线束末端未包覆长度并得到线束节点坐标修正值, 最后进行未包覆段补包。**结果** 实验表明, 此系统在检测末端节点数少于 10 个的线束末端包覆质量的准确度维持在 97.22% 以上。补包后偏差量的绝对值小于 2 mm, 且重复性精度为 1.07 mm。**结论** 该检测系统稳定可靠, 能满足实际生产中对线束包覆质量的检测, 提高了线束包覆生产线的自动化和智能化水平。

关键词: 工业机器人; 机器视觉; 线束包覆; 归一化匹配

中图分类号: TB486; TH164 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)13-0237-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.13.034

Detection System for Harness End Coating Quality Based on Machine Vision

ZHANG Hui-min, XUE Chen, GUO Xing-zhao, HUANG Cheng

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

ABSTRACT: The paper aims to design a detection system for harness end coating quality based on machine vision on the basis of industrial robot and industrial camera to automatically and accurately identify the end coating quality of automotive harnesses. The CCD industrial camera placed in the industrial robot arm was used in the system to collect image information. First, the system was calibrated by HALCON. Secondly, the gradient coordinates and other preprocessing, corner detection and other methods were used to obtain the node coordinates of the harness. And then, based on the normalized matching standard, the multi-region double-layer multi-threshold template matching algorithm was proposed to identify the end-wrapping quality of the harness quickly, calculate the uncoated length of the end of the harness, and obtain the correction value of the harness node. Finally, the unwrapped segment was replenished. The experiment showed that the accuracy of the coating quality at the end of the harness with less than 10 nodes at the end of the detection system was maintained above 97.22%. The absolute value of the deviation after the replenishment was less than 2 mm, and the repeatability accuracy was 1.07 mm. The detection system is stable and reliable, can meet the detection requirement of wire bundle coating quality in actual production. It improves the automation and intelligence level of the harness coating production line.

KEY WORDS: industrial robot; machine vision; harness coating; NCC match

收稿日期: 2019-10-23

基金项目: 上海市联盟计划 (LM201630)

作者简介: 张慧敏 (1962—), 女, 博士, 上海应用技术大学教授、硕导, 主要研究方向为过程流体机械结构优化和性能分析, 压力容器和管道缺陷评定, 机械设备自动化及稳定性。

汽车线束是汽车电路系统的网络主体,直接关系到车辆的稳定性与安全性,同时随着汽车功能的增加,高端的汽车多分支线束供给严重不足^[1]。线束包覆是线束生产工艺的重要环节之一,线束包覆质量直接关系到其绝缘电路的功能,对车辆电路系统正常使用有着较大的影响^[2]。

近年来,随着图像处理技术的发展,机器人视觉技术已经在工业生产领域得到了广泛应用^[3-7]。在线束生产中也有部分研究,Shi G M^[8]通过使用颜色匹配算法确定线束装配合格率,提高了检测效率。黄思博^[9]利用测试台架检测线束端子,通过基于多层感知器的颜色识别模型对线束端子缺陷进行检测,因此将工业机器人与工业相机相结合的线束视觉检测系统可使多分支汽车线束末端的包覆检测具有高效率、高质量和高可靠性的优势^[10]。

文中基于机器视觉对线束末端包覆质量进行检测,使用置于工业机器人手臂的 CCD 工业相机采集线束图像信息,运用 HALCON 对系统进行标定,对采集到的图像进行处理得到线束的节点坐标,以归一化为基础的多区域双层匹配算法对线束末端包覆质量快速识别,计算线束末端未包覆的长度并得到线束节点坐标修正值后,输入控制系统,使其操控工业机器人进行未包覆段的补包。

1 系统设计

1.1 系统架构

车线束末端包覆质量检测动态系统主要由硬件系统和软件系统组成,硬件系统主要为图像采集模块与机器人运动控制模块;软件系统主要完成线束图像的处理与线束末端包覆质量算法的执行。系统的工作流程:工业机器人移动到布线板中央正上方,置于机器人手臂前端的工业相机采集线束图像得到节点信息,根据节点信息开始包覆线束,包覆到线束末端,外设备触发工业相机采集线束末端包覆图像并通过 WLAN 传送到上位机中,上位机中的图像处理软件对图像进行预处理,再执行相关算法,根据未包覆长度与原节点信息得到节点修正值。最后将节点修正值通过 C#编程 TCP/IP 协定导入 Kuka Sim Pro 中,通过工业机器人完成线束末端未包覆段的补包。

1.2 成像系统组成

成像系统的简易视图见图 2,主要由工业机器人系统、视觉检测系统及线束控制系统组成。工业机器人为库卡公司的 KUKA KR6 r900sixx,机器人末端执行器为自制的线束包覆机构。视觉检测系统中的相机选择维视的 MV-EM510C,分辨率最高为 2456 像素×2058 像素,最大帧率为 15 Hz,采用 Computer 公

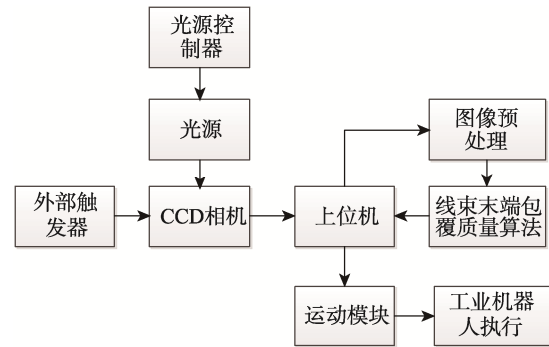


图 1 系统架构

Fig.1 Architecture diagram of system

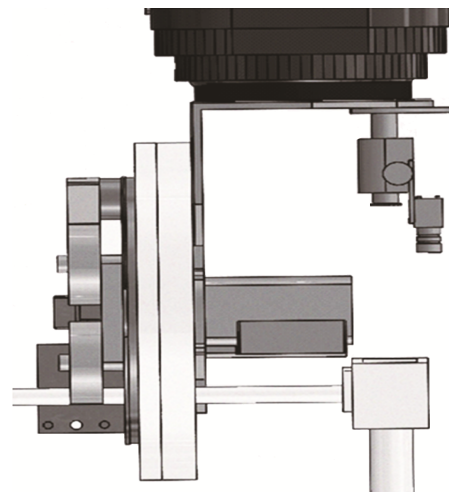


图 2 成像系统组成简易视图

Fig.2 Simple view of imaging system composition

司的可变焦 M1614-MP3 镜头、康视达条形光源及光源控制器。该系统利用 KRL 编程语言控制 Kuka 机器人,机器人外接 PLC 控制伺服电机的转动,可以实时控制横向包覆的速度,工业相机由外部设备触发。

2 线束末端包覆质量算法

文中线束包覆质量检测方法及流程见图 3。

2.1 相机标定

相机标定^[11]实质是坐标系的转化,是把像素坐标通过相机坐标作为中间量转化为世界坐标。文中标定的作用是准确识别出修正线束节点的像素坐标,并转化为世界坐标值,以完成线束末端应包但未包段的补包。

由于作为拍摄目标的布线板尺寸为 850 mm×650 mm,选择视野面积 1/5~1/3 的标定板为最佳,故自制外形尺寸为 3500 mm×3500 mm、7 mm×7 mm 圆阵列、31.25 mm 中心距、15.625 mm 原点半径的标定板,像素元为 3.45 μm 的工业相机采集 15 副标定图像,得出了相机的 4 个内参数见表 1。表 1 中, S_y, S_x 为缩放比例因子; a_y, a_x 为图像的主点与投影中心的连线。

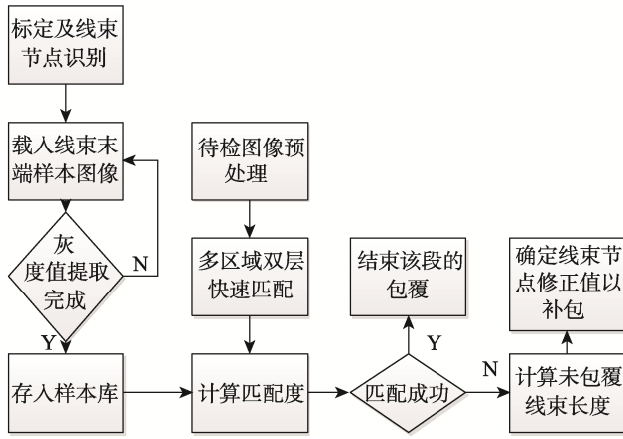


图 3 线束末端包覆质量方法流程

Fig.3 Harness end coating quality method flow

表 1 相机标定内参数

Tab.1 Intrinsic parameter of camera calibration

参数	$S_x/\mu\text{m}$	$S_y/\mu\text{m}$	a_x	a_y
数值	3.45	3.45	1628.45	1154.32

相机畸变^[12]对于成像的坐标转化精确性产生影响,故对于标定图像畸变校正见图 4,畸变模型见式(1)

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - 4k(u^2 + v^2)}} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{S_y} + a_y & 0 \\ 0 & \frac{1}{S_x} + a_x \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: (u,v) 为像素坐标系上的点; k 为径向畸变量级; (x,y) 为相机坐标系上的点; S_x, S_y 为缩放比例因子; a_x, a_y 为图像的主点与投影中心的连线。

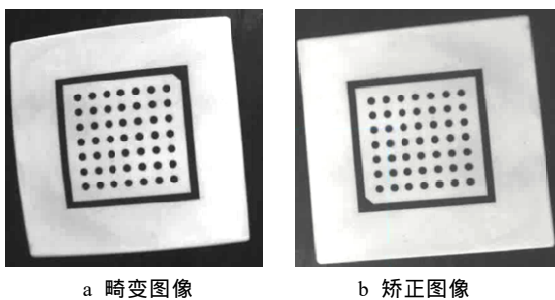


图 4 畸变图像与矫正图像

Fig.4 Distorted image and corrected image

2.2 线束节点识别

线束节点识别的作用主要是在线束末端包覆质量识别中,检测出线束末端未包量后在原识别出的线束节点坐标基础上得到线束节点修正值,再利用工业机器人根据线束节点修正值进行线束末端补包。

由于采集到的线束节点图像显示,其亮暗不均

匀,且有一些明显的噪点不利于之后的特征提取,故需要预处理。对于随机噪点利用 3×3 中值滤波器并增强了其对比度,然后进行二值化处理转化为灰度区域并提取阈值较低的区域。通过几何特征提取面积,圆度选择及几何填充等处理方法得到了线束的区域,最后通过梯度边缘腐蚀像素点,得到显示明显的预处理图像见图 5a。

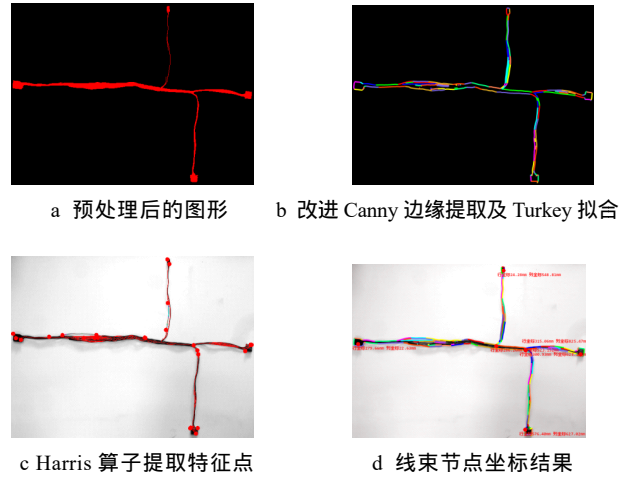


图 5 线束节点坐标识别

Fig.5 Coordinate recognition of harness node

对于预处理好的线束节点图像,需要通过边缘提取,特征点筛选得到线束节点坐标。通过饱和度图像的双边滤波的改进 Canny 算法提取边缘信息,利用在特征点添加双重权重函数的 Tukey 算法^[13]进行拟合见图 5b。改进 Canny 边缘提取及 Turkey 拟合出的轮廓特征点仍有些多,不易于直接提取工位坐标,故用带缩放矩阵 Harris 角点检测算子提取线束特征点见图 5c, Harris 算子如下所示:

$$\begin{aligned} A &= w(x,y) \otimes I_x^2 \\ B &= w(x,y) \otimes I_y^2 \\ C &= D = w(x,y) \otimes (I_x, I_y) \\ M &= P \begin{pmatrix} A & D \\ C & B \end{pmatrix} \\ R &= (AB \times CD)^2 - k(A+B)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中: M 为像素点相关矩阵; R 为 Harris 角点算子响应; P 为缩放矩阵。

Harris 算子提取的角点坐标仍有一部分在直线上,根据简化的 LSD 直线段检测依次相邻特征点之间的梯度值,如果都在容忍值之间,则该点是线束直线上的特征点,需要将其剔除。集合线束节点附近的特征点,采用最小二乘法拟合成曲线,取 20 个相邻点并计算其曲率半径的均值,得到其节点坐标见图 5d。

2.3 线束末端包覆质量算法

线束末端包覆质量由于线束的自身柔性,在线束包覆过程中会产生扭转变形,轴向拉伸变形等使原有线束变长,导致工业机器人包覆至线束节点坐标时,线束末端仍有一部分未包覆,所以需要计算线束末端未包覆长度,得到线束坐标修正值以完成补包。

在包覆线束到线束末端时,通过外部设备触发工业相机采集线束末端包覆图像,对于采集到的图像,进行颜色识别处理,转化为饱和度图像见图 6a,由于待测图像与样本图像存在偏转角度,不利于后面匹配,故采用仿射变化^[14]校正图像位姿见图 6c,最后利用多区域双层模板匹配进行匹配度检测。

仿射矩阵:

$$M_T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & T_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中: M_T 为经过仿射变化后坐标矩阵; T_x, T_y 为二维平面的沿 x, y 轴平移距离; α 为二维平面内旋转的弧度。

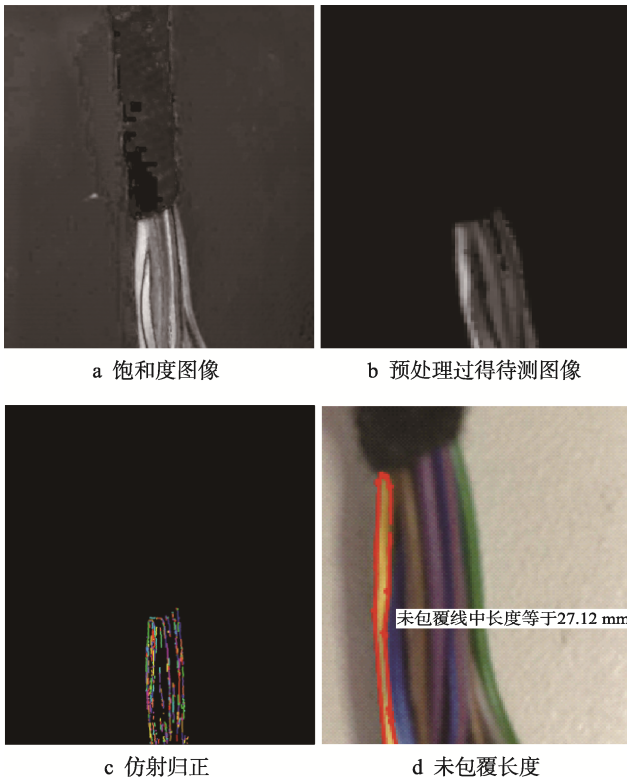


图6 线束末端包覆质量算法过程

Fig.6 Harness end coating quality algorithm process

模板匹配原理:首先将样本图像旋转 360 次每次旋转 1 度存放在样本库中,把待检测图像左上角区域与样本图像左上角区域进行对比(待检测区域与选取的样本区域尺寸一致),得到其匹配度;再依次平移 1 个像素,执行同样操作,直到待测图像的右下角与

样本图像右下角重合。文中使用归一化相关匹配原则,主要是以图像灰度值为信息,通过样本图像与待测图像的灰度值相关函数,得其匹配度。

相关函数如下:

$$R(i, j) = \frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y [S_{i,j}(x, y) \times T(x, y)]}{\sqrt{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y [S_{i,j}(x, y)]^2 \times \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y [T(x, y)]^2}} \quad (4)$$

式中: $S_{i,j}(x, y)$ 为待测图像; $T(x, y)$ 为样本图像; (i, j) 为待测图像在样本图像上的坐标; $R(i, j)$ 为匹配结果; $R(i, j)$ 值越大,匹配度越高。

以归一化相关匹配^[15]为基础,文中提出了多区域双层模板匹配,具体流程如下所述。

1) 将样本图像(像素值为 $M \times N$)与待测图像(像素值为 $m \times n$)分单元。第 1 单元为以图像中心点为中心的 1/4 图像长和 1/4 图像宽的矩形区域;第 2 单元为除去第 1 单元的以图像中心点为中心的 1/2 图像长和 1/2 图像宽的镂空矩形区域;第 3 单元为除去第 1 单元,第 2 单元的原图像。并把图像比例缩小,第 1 层为原像素值的 1/2,第 2 层为原图像。

2) 对于第 1 层第 1 单元依行依点进行匹配,得到 $R(i, j)$ 值,将 $R(i, j)$ 值与预设阈值进行对比,大于阈值时,则进行第 1 层下一单元的匹配直到遍历第 1 层各单元。

3) 对于在第 1 层各单元中 $R(i, j)$ 均大于阈值的待测图像在第 2 层检测时只取第 3 单元进行检测,如果 $R(i, j)$ 值大于预设阈值,匹配成功,否则匹配失败。

4) 对于匹配失败的图像通过边缘提取测量线束末端未包覆长度 L 见图 6d 及与竖直方向的夹角 θ ,取当前点的节点坐标 (x, y, z) ,得到节点修正值 $(x_{correction}, y_{correction}, z_{correction})$ 。修正值函数为:

$$\begin{pmatrix} x_{correction} \\ y_{correction} \\ z_{correction} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L \sin \theta & 0 & 0 \\ 0 & L \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \sqrt{(L+D)^2 - D^2} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中: D 为该线束段的长度; L 为该线束段末端未包覆的长度。

得到修正值后,工业机器人手臂的自制包覆机构从原节点坐标沿 θ 方向包覆至修正后的节点坐标值处。

3 实验论证

3.1 系统工作流程

在得到标定与节点坐标后,工业机器人开始包覆线束。当包覆至线束末端时,断带,外设备触发置于机器人手臂前端的 CCD 相机采集图像,线束末端未

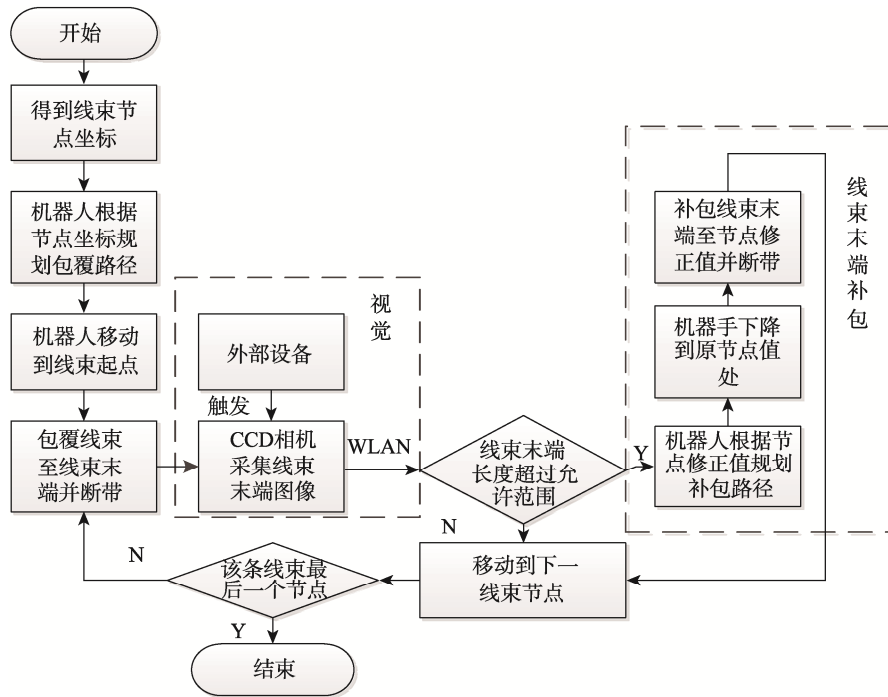


图 7 系统工作流程

Fig.7 Work flow chart of system

包覆长度不超过允许范围,机器人直接移到下一线束段起点进行包覆。如超过允许范围,上位机的处理软件通过 TCP/IP 传输节点修正值给控制系统,控制系统开始规划补包路径,然后机器人启动,下降到原节点处,开始补包至节点坐标修正值处,断带,机器人移动到下一线束段起点处,开始包覆,重复上述步骤,直到整条多分支线束被完全包覆。系统流程见图 7。

3.2 实验结果

实验在样本库建立中,选取了企业提供的 60 个包覆合格的线束末端样本,并对 420 个线束节点(分别为 5 个末端节点、7 个末端节点和 9 个末端节点的 60 条多分支线束)的末端包覆质量进行了检测。实验是通过在上位机上采用 HALCON 与 C#以及 Kuka Sim Pro 联合实现图像处理及控制机器人的补包。C#界面见图 8。

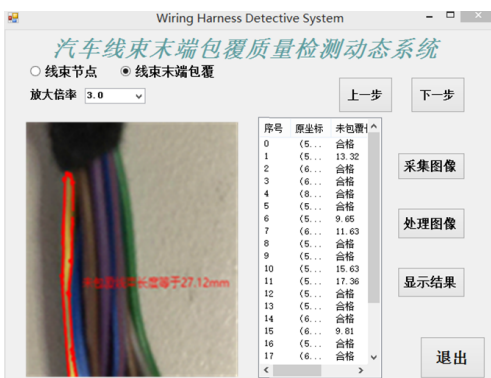


图 8 检测系统控制界面

Fig.8 Control interface of detection system

采用人工目检的线束末端包覆质量与文中的多区域双层的多阈值模板匹配算法检测准确度对比见表 2。

表 2 匹配算法与人工目检准确度对比
Tab.2 Accuracy comparison between matching algorithm and manual visual inspection

检测序号	节点数	误检数		准确率/%	
		目检	视觉	人工	视觉
1	100	7	1	93.00	99.00
2	140	23	3	83.57	97.85
3	180	30	5	83.33	97.22

取前 20 组补包前包覆不合格的线束末端未包覆长度与允许范围的偏差量,与补包后的偏差量对比。

通过表 2 可以发现,对于末端节点数多的线束组(检测序号 3),此匹配算法的准确度相比末端节点数少的线束组(检测序号 1 与检测序号 2)稍有下降,但此算法在检测末端节点数少于 10 个的线束末端包覆质量的准确度维持在 97.22%以上,具有较高的检测准确度,检测效果明显优于人工目检,而且该算法能够快速识别,识别平均时间为 812 ms,远远低于人工目检的时间。由图 9 通过补包前包覆不合格的线束末端未包覆长度与允许范围的偏差量,与补包后的偏差量对比,得出该系统能够有效对包覆不合格的线束末端进行有效的补包,补包前,偏差量在 2~11 mm 之间,补包后,偏差量的绝对值小于 2 mm,且重复性精度为 1.07 mm,因此,工业机器人可以有效、准确地对包覆不合格的线束末端进行补包。

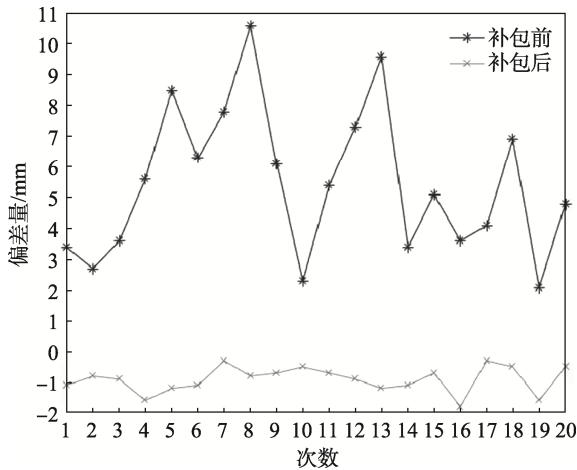


图9 线束末端补包前后偏差值

Fig.9 Deviation before and after replenishment at the end of the harness

4 结语

文中研究了一种基于机器视觉的汽车线束末端包覆质量检测动态系统,对该系统以工业机器人和工业相机为基础的硬件组成进行了概述,在得到标定和线束节点坐标后,以归一化匹配标准为基础,采用多区域双层的多阈值模板匹配算法对线束末端包覆质量快速识别,实现了线束末端包覆质量快速准确的筛选,把线束节点坐标修正值输送控制系统,完成工业机器人对包覆不合格的线束末端的补包。实验结果证明,该系统对于线束末端未包覆量识别准确性高,稳定性好,对线束包覆行业实现自动化和智能化有着较高的参考价值。

参考文献:

- [1] 潘景徐. 浅析汽车线束的现状和发展趋势[J]. 科技经济导刊, 2018, 26(18): 67—68.
PAN Jing-xu. Analysis Of The Current Situation And Development Trend of Automotive Wiring Harness Technology And Economic Guide, 2018, 26(18): 67—68.
- [2] FERNANDES M M, ALMEIDA I A D, JUNIOR H M. Automotive Miniaturization Trend: Challenges For Wiring Harness Manufacturing[C]// SAE Brasil 2010 Congress And Exhibit, 2010.
- [3] 许敏, 马钺, 陈帅, 等. 基于机器视觉的奶粉罐体商标区域定位方法[J]. 包装工程, 2018, 39(21): 27—31.
XU Min, MA Yue, CHEN Shuai, et al. Location Method of the Trademark Area of Milk Powder Cans Based on Machine Vision[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(21): 27—31.
- [4] 胡宏宇, 王景良, 朱龙彪, 等. 基于机器视觉的制袋机裁切定位系统设计[J]. 包装工程, 2019, 40(3): 200—206.
HU Hong-yu, WANG Jing-liang, ZHU Long-biao, et al. Design of Location System for Cutting of Bag Making Machine Based on Machine Vision[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(3): 200—206.
- [5] 唐启慧, 谷紫颖, 李振华. 基于机器视觉的注射液针头胶帽缺陷检测[J]. 包装工程, 2019, 40(13): 201—206.
TANG Qi-hui, GU Zi-ying, LI Zhen-hua. Defect Detection for Needle Cap of Injection Based on Machine Vision[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(13): 201—206.
- [6] 杨健, 辛浪, 豆昌军. 基于机器视觉技术的瓶盖划痕检测[J]. 包装工程, 2019, 40(13): 227—232.
YANG Jian, XIN Lang, DOU Chang-jun. Bottle Cap Scratch Detection Based on Machine Vision Technology[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(13): 227—232.
- [7] 李姿景. 基于机器视觉的药品包装生产线自动检测系统[J]. 包装工程, 2018, 39(17): 165—169.
LI Zi-jing. Automatic Detection System for Drug Packaging Line Based on Machine Vision[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(17): 165—169.
- [8] SHI G M, JIAN W. Wiring Harness Assembly Detection System Based On Image Processing Technology[C]// International Conference On Electronics, IEEE, 2011.
- [9] 黄思博, 蔡昭权, 方晓彬, 等. 基于机器视觉的汽车线束外观检测方法研究[J]. 现代计算机, 2019(19): 87—92.
HUANG Si-bo, CAI Zhao-quan, FANG Xiao-bin, et al. Research on Recognition Method of Automobile Harness Appearance Based on Machine Vision[J]. Modern Computer, 2019(19): 87—92.
- [10] JIANG X, KOO K M, KIKUCHI K, et al. Robotized Assembly of A Wire Harness In Car Production Line[C]// Ieee/rsj International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE, 2010: 490—495.
- [11] LIU X P, CHEN Y C, PANG Z F. Camera Calibration Technique Based on HALCON Machine Vision[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 365/366: 666—671.
- [12] 孔斌, 方廷健. 一种简单而精确的径向畸变标定方法[J]. 中国图象图形学报, 2018, 9(4): 429—434.
KONG Bin, FANG Ting-jian. A Simple and Precise Method for Radial Distortion Calibration[J]. Journal of Image and Graphics, 2018, 9(4): 429—434.
- [13] 王峰, 丘广新, 程效军. 改进的鲁棒迭代最小二乘平面拟合算法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(9): 1350—1354.
WANG Feng, QIU Guang-xin, CHENG Xiao-jun. An Improved Robust Method for Iterating Least-squares Plane Fitting[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2011, 39(9): 1350—1354.
- [14] 曾文锋, 李树山, 王江安. 基于仿射变换模型的图像配准中的平移、旋转和缩放[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(1): 18—20.
ZENG Wen-feng, LI Shu-shan, WANG Jiang-an. Translation, Rotation and Scaling Changes in Image Registration Based Affine Transformation Model[J]. Infrared And Laser Engineering, 2001, 30(1): 18—20.
- [15] 张开生, 韦逸野. 数字化功能信息纸张的产品建模与图像识别研究[J]. 中国造纸学报, 2018, 33(1): 61—66.
ZHANG Kai-sheng, WEI Yi-ye. Research on Products Modeling and Image Identification of Digital Function Information Paper[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2018, 33(1): 61—66.